

风力 / 能发电的发展现状和展望

陈璟华, 杨宜民

(广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510090)

摘要: 风能和太阳能是资源丰富的可再生能源, 发展风能和太阳能发电是改善能源结构、减少环境污染和保护生态环境的重要举措. 阐述了国内外风力发电和太阳能发电的发展现状及趋势, 针对风能和太阳能间歇性的特点, 提出利用风能和太阳能互补发电, 并介绍国内外相关研究现状.

关键词: 风力发电; 太阳能发电; 风力 / 太阳能互补发电

中图分类号: TK8

文献标识码: A

文章编号: 1007-7162(2007) 03-0001-05

从 20 世纪 70 年代发生世界性能源危机以来, 许多国家都更加重视新能源和可再生能源的研究、开发和利用工作. 风能、太阳能等可再生能源储量巨大、分布广泛、无污染且无处不在. 理论上讲, 较小一部分的风力和太阳能资源就可满足人类的能源需求, 因此利用风能和太阳能受到世界各国普遍重视. 2005 年 2 月 16 日, 旨在减少温室气体排放的《京都议定书》的正式生效, 给世界各国大力发展风能发电、太阳能发电施加了一份有效的催化剂; 一些国家也制定与实施了相关的优惠政策和法律法规, 以保护和促进新能源包括风能、太阳能的开发利用. 我国也开展了“乘风计划”和“光明工程”, 以发展我国自己的风能发电和太阳能发电产业, 推动新能源技术的应用.

力发电机组, 建成了世界上第一座风力发电站. 100 多年来, 世界各国成功研制了类型各异的风力发电设备. 进入 20 世纪 90 年代, 风力发电受到世界各国的普遍重视. 在风电机组、风电价格、风机技术和国家政策等方面都有了很大的发展与进步.

1) 世界装机容量

从 20 世纪 70 年代发生世界性能源危机以来, 许多国家都更加重视新能源和可再生能源的研究、开发和利用工作. 在新能源领域风力发电技术比较成熟, 商品化大型风力发电机组单机容量从 55 kW 增加到 1 650 kW, 风电装机容量持续增长. 到 2002 年底, 世界风电装机容量前 10 名的国家依次是德国、西班牙、美国、丹麦、印度、意大利、荷兰、英国、中国和日本. 具体情况如表 1 所示^[3].

1 风力发电的发展状况及趋势

风能是地球表面空气从压力高的地方向压力低的地方移动时产生的动能, 太阳辐射的能量在地球表面约有 2% 转化为风能^[1]. 根据荷兰和美国对风能资源的研究, 考虑城镇、森林、复杂地形、交通困难的山区及社会环境的制约, 如景观和噪音影响等, 如果取具有风能资源土地面积的 4% 推算, 可利用的风能资源储量估计约 9.6 GW^[2]. 利用风能进行发电, 技术条件较为成熟, 它将有效地减少一次性能源的使用, 减少温室气体与污染尘埃的排放, 有利于保护环境与生态的平衡. 大力发展风力发电已经成为各国政府的重要选择.

1.1 世界风力发电的发展现状及趋势

19 世纪末, 丹麦人首先研制了世界上第一台风

表 1 世界风电装机容量前 10 名 MW

排序	国家	1998 年底	1999 年底	2000 年底	2001 年底	2002 年底
1	德国	2 874	4 442	6 107	8 734	12 001
2	西班牙	880	1 812	2 836	3 550	4 830
3	美国	2 141	2 445	2 610	4 245	4 685
4	丹麦	1 420	1 738	2 341	2 456	2 880
5	印度	992	1 035	1 220	1 456	1 702
6	意大利	197	277	424	700	785
7	荷兰	379	433	473	523	688
8	英国	338	362	425	525	552
9	中国	200	262	352	406	468
10	日本				275	415
	合计	9 421	12 806	16 788	22 870	29 006

从表 1 中可以看出, 欧洲是风力发电的主力军.

收稿日期: 2007-03-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60534040); 广东省自然科学基金资助项目 (05001819)

作者简介: 陈璟华 (1974-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为智能控制在电力系统中的应用.

其中,德国的风力装机容量居世界首位,占世界装机容量的 30% 以上.到 2004 年,德国的风力发电量为 260 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 首次超过了水力发电量 (210 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$), 风能成为德国最重要的可再生能源. 亚洲 2004 年风力发电总装机容量为 4.276 GW, 仅占世界风电市场的 9.9%. 其中印度是亚洲风力发电发展最快的国家, 其次是日本, 中国 2004 年的总装机容量是 764 MW, 位居亚洲第 3 世界第 10.

2) 风机单机容量

风力发电成本与风力发电机容量相关. 一般来说, 单机容量越大, 成本越低. 因此, 发达国家的风机功率正稳步地走向大型化, 以达到经济的规模尺寸. 1985 年, 风机的主力机型的容量为 55 kW ^[4], 到 2003 年, 全球安装的风机平均装机容量达 1.2 MW, 主力机型已是兆瓦级. 目前, 世界最大的风机是德国 REpower 公司生产的 5 MW 风力发电机, 它已于 2005 年 2 月 3 日投入运行^[5]. 目前, 低于 600 kW 的风机几乎不再生产.

3) 风电技术

随着浆叶空气动力学、新材料技术、发电技术、计算机和控制技术的发展, 风力发电技术不断发展.

功率调节是风力发电机组的关键技术之一. 目前, 风机采用的功率调节方式主要有定桨距失速调节、变桨距调节、主动失速调节和变速调节等^[1, 6-7].

定桨距调节于 20 世纪 80 年代中期进入风电市场, 它采用软并网技术、空气动力刹车技术、偏航与自动解缆技术, 解决了风力发电机组的并网问题和运行的安全性与可靠性问题, 但发电效率较差.

变桨距风机于 20 世纪 90 年代进入风电市场, 这种机组启动时可对转速进行控制, 并网后可对功率进行控制, 使风机的起动性能和功率输出特性都有了显著改善.

主动失速控制是定桨距失速调节与变桨距调节方式的组合. 这种类型的风机在低风速时采用变桨距调节, 可达到更好的气动效率; 额定功率后, 桨距角减小, 功角增大, 叶片失速效应加深, 从而降低了风轮的旋转速度, 限制风能捕获.

变速风机于 20 世纪 90 年代中期进入风电市场. 其特点是: 低于额定风速时, 它能跟踪最佳功率曲线, 使风机具有最佳的风能转换效率; 高于额定风速时, 它增加了传动系统柔性, 使功率输出更稳定^[1, 8]. 实践表明, 变速风电机组比恒速风电机组的效率提高 10% 以上, 而且减少了运行时的噪声.

4) 促进风电发展的优惠政策

风能是一种绿色能源, 它是可再生的、没有污染的. 为了减少有限的一次性能源的开采与消耗、减少污染与温室效应, 应对高涨的能源需求, 积极开发、利用风能进行发电是一种不可或缺的途径.

20 世纪 80 年代美国对风电实行了扶持政策, 风力发电获得了快速发展. 1990 年底, 美国的风电装机容量达到 163 万 kW , 占当时全球风电装机容量的 63.92%, 位居世界之首.

在欧洲, 丹麦一直执行一套风电价格支持体系, 多年来一直鼓励风力发电设备的私有化和合作化, 促使风电得到快速的发展. 1990 年末, 丹麦风电装机容量为 34.4 万 kW , 到 2000 年底, 装机容量已达 230 万 kW , 占当时全球风电装机容量的 12.92%.

德国于 1991 年开始支持风电产业的发展, 鼓励企业和个人投资, 允许风电投资者发出的风电就近上网; 各电力公司要投资风电, 上网发电电价高出电网平均电价部分可由电力公司在全网的用户中分摊. 在一系列支持及优惠政策的激励下, 2000 年底, 德国风电的装机容量已达 611 万 kW 左右, 跃居世界首位, 风电可满足国内 2.5% 的电力需求. 据德国风电协会 (BWE) 消息, 2005 年德国风电发电量预计将由去年的 260 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 增加到 279 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 风电将满足德国电力需求的 5.77%^[9].

相应地, 英国出台了 UFFO (非化石燃料公约), 取得了良好的效果. 西班牙等国也都制定了相应的政策、法规来推动风力发电的发展. 2005 年 2 月 16 日, 旨在减少温室气体排放的《京都议定书》正式生效, 给世界各国发展风能发电注入了一份有效的催化剂, 促使许多国家制定与实施了有关的优惠政策和法律法规, 以支持风电产业的发展.

随着风电技术的进步和成本降低, 风电比例会逐渐提高. 欧洲风能协会的研究表明: 从技术、经济和资源等方面考虑, 2020 年全球 12% 的电能可以来自风电. 预计到 2010 年, 世界风电装机容量可达 230 GW, 2020 年风电装机可达 1231 GW, 风电成本下降 40%^[10].

1.2 我国风力发电的发展现状

我国对风力发电技术的研究始于 20 世纪 50 年代后期, 当时在偏远的农村、牧区、海岛建设了独立运行的功率在 10 kW 以下的小型风电装置^[11], 之后基本处于停滞状态. 70 年代中后期, 由于世界能源危机的影响, 一些部门的研究机构及大学相继展开了风力发电的研究工作.

1) 风电场的建设

我国风电场的建设始于 20 世纪 80 年代中期. 1985 年, 在海南省的东方风电场安装了 1 台 55 kW 风机; 1986 年, 在山东荣成建成了我国第一座并网运行的风电场. 经过近 20 年的建设, 我国的风电产业有了很大的进展. 到 2002 年底, 我国已建成 32 个风电场, 其中装机容量居前 3 位的风电场依次为新疆达坂城二场、广东南澳风电场和内蒙古辉腾锡勒风电场. 风电发展最快的 4 个省份(自治区)分别是辽宁、新疆、广东和内蒙古, 总装机容量占全国风电的 75%. 到 2002 年底, 这 4 个省(自治区)风电场发电情况见表 2^[12].

到 2004 年底, 我国在 14 个省市已建成 43 个风电场, 总装机容量为 76.4 万 kW^[13].

表 2 2002 年底各省(自治区)实际装机

排序	省份 (自治区)	风机 台数	容量 / 占总装机容量的	
			占比 %	百分比 %
1	辽宁	173	19.53	21.99
2	新疆	188	21.22	19.23
3	广东	165	18.62	17.01
4	内蒙古	149	16.82	16.27

2) 风电机组

我国 80 年代建设投运的机组单机容量普遍较小, 以 55 kW 为主力机型, 且全部为进口产品. 目前, 我国的风力发电机的主力机型已发展到 600~750 kW; 2004 年累计风电设备市场份额中, 国内企业已占 18%^[14]. 经过多年的实践, 我国已基本掌握大型风电机组的设计、制造技术, 主要零部件国内都能自己研发制造, 600 kW 的风电机组的国产化率已达 90%^[15]. 2005 年 4 月, 由新疆金风科技股份有限公司开发研制的 1.2 MW 直驱式永磁风力发电机完成吊装, 意味着中国风机设计制造能力已达到世界先进水平^[16].

3) 发展风电存在的问题及优惠政策

在风力发电迅猛发展、前景日益广阔的情况下, 风力发电成本过高、风能分布不均衡、风电质量未加控制和改善就上网, 对局部电网的谐波和稳定性的影响等问题, 严重制约了我国风电事业的发展. 为此, 国家计委提出“乘风计划”, 对我国的风电发展给予相应的政策扶持, 使我国研制的大型并网型风电机组真正从科研走向市场. 另外, 于 2006 年 1 月起实施的《中华人民共和国可再生能源法》, 从政策和法律的角度为风电产业的发展提供了保证.

2 太阳能发电的发展现状及趋势

太阳能是一种可再生能源, 干净、无污染、取之

不尽用之不竭. 照射到地球上的能量比人类消耗的能量大 6 000 倍, 且太阳能发电具有安全可靠、使用寿命长、运行费用少、维护简单、无噪声和无污染等优点. 因此, 研究太阳能发电对今后能源与电力的发展有着特别重要的意义.

2.1 世界太阳能发电的发展趋势

太阳能发电于 20 世纪中叶才起步, 1954 年美国 Bell 实验室研制了第一片实用型单晶硅半导体电池, 成为太阳能电池的先驱, 开辟了太阳能光伏发电的新纪元. 20 世纪 80 年代以后, 太阳能光伏发电得到迅速增长. 1991 年太阳能发电装机容量为 55 MW, 2001 年为 400 MW, 2002 年为 540 MW, 2003 年为 742.28 MW, 2004 年达到 964.96 MW, 到 2005 年底, 世界太阳能光伏发电装机容量达到 4 961.69 MW^[17-18]. 已建成 10 多座 MW 级的光伏发电系统. 太阳能光伏电池 / 组件的价格已大幅下降, 在国际市场上, 目前太阳能电池的价格大约为 3.15 美元 / W, 并网系统价格为 6 美元 / W^[19]. 预计 2010~2015 年光伏组件成本可以下降到 1 美元 / W.

自 1984 年美国 LUZ 公司建成第一个发电系统以来, 太阳能发电每千瓦装机容量的投资已由 6 000 美元降至 2 875 美元, 第一个发电系统的平均效率为 10%, 现已提高到 14%^[20]. 预测到 2020 年并网光伏发电系统的价格将从目前的 7.0 美元 / (kW · h) 下降到 1.52 美元 / (kW · h), 发电成本将从目前的 0.245 美元 / (kW · h) 下降到 0.053 美元 / (kW · h).

2.2 我国太阳能发电的发展现状及展望

据估计, 我国的太阳能辐射功率达 9.6×10^{12} kW, 每年辐射量可达 5.7×10^{22} J, 相当于 1.9×10^{12} t 标准煤或 2.5×10^{12} 桶石油的能量^[21-22]. 开发利用, 进行光伏发电是一项十分诱人的产业.

我国太阳能电池的研究始于 1958 年, 1959 年研制成功了第一组有实用价值的太阳能电池. 1971 年 3 月首次成功地应用于我国第二颗卫星上, 1973 年开始在地面上应用, 1979 年开始生产单晶硅太阳能电池. 20 世纪 90 年代初中期, 我国光伏产业处于稳定增长时期, 产量逐年稳步增加. 2002 年底, 我国建成了 10 MW 多晶硅电池生产线, 使生产能力在该年有了较大增加, 到 2003 年底我国光伏产业总的生产能力达到 38 MW.

在市场方面, 我国光伏装机容量不断增加. 特别是 2002 年国家计委启动西部 7 省“送电到乡”工程, 使装机容量大幅增加, 截至 2003 年底, 我国光伏系统累计装机容量达 55 MW^[23]. 目前, 甘肃省(敦煌 8

MW_p并网光伏发电系统建设预可行性研究报告》通过专家评审。8 MW 并网型光伏发电系统建设在我国尚属首次,在全世界也是最大的(目前德国有 5 MW 系统)。

预计,在今后几十年,我国光伏发电市场将要发生巨大的变化,2010 年以前,我国的太阳能电池多用于独立光伏发电系统,2011~2020 年,中国光伏市场将会由独立系统转向并网发电系统。我国光伏产业的技术有望达到世界先进水平。

3 风力/太阳能互补发电的研究现状

因为风能和太阳能都有间歇性的特点,因此利用风力/太阳能互补发电是一种比单一风力或太阳能发电更经济更有效的发电方式,但是目前国内外主要从事独立风力发电和独立太阳能发电的研究,从事风力/太阳能互补发电的研究较少,尚处于起步阶段^[24]。

国外, Rajesh Karki 和 Roy Billinton^[25-26] 研究了独立小型风力/太阳能发电系统的成本和可靠性计算及混合发电系统的扩容问题。国内,中国科学院电工研究所的许洪华、赵斌等人讨论了一种解决风力/太阳能互补发电系统非线性优化的方法,并采用遗传算法搜索确定系统的最优控制策略和最优配置方案^[27]。西安交通大学的李福利等人针对在设计风力/太阳能互补发电系统中存在设备配置随意造成投资大等问题,提出“局部-整体法”作为风力/太阳能互补发电系统的优化设计方法,并在气候资源上有很强可比性的两个地区的具体系统设计上验证了该方法的运用^[28]。在风力/太阳能互补发电系统的能量管理控制方面,华南理工大学的吴捷、杨萃教授等人提出一种基于分级模糊算法的互补发电的能量管理系统,该能量管理系统采用集中式控制,针对系统的输入量较多的特点,设计了一个四级的分级模糊控制器来实现互补发电系统的管理和控制。仿真结果表明,其所设计的分级模糊控制器能够对互补发电系统实施有效的控制^[29-30]。

4 结束语

风能、太阳能等可再生能源储量巨大、分布广泛、无污染且无处不在。实用型风力发电、太阳能发电和风力/太阳能互补发电的研制,符合我国由大机组、大电厂、大电网向大电网与小型、分散电源相结合的新能源发展政策。面向市场研制和开发性能优良、运行可靠、电能品质优良、可短期见效的商品化

机组,实现风/光互补发电,已成为今后我国综合利用绿色能源的发展趋势,特别是在为在偏远无电地区实现分散、小型、高效、清洁电力的自给供应提供了一条有效的途径。

参考文献:

- [1] 叶杭治. 风力发电机组的控制技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002
- [2] 施鹏飞. 21 世纪风力发电前景 [J]. 中国电力, 2000, 9(33): 78-84
- [3] 陈树勇, 戴慧珠, 白晓民, 等. 风电场的发电可靠性模型及其应用 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(3): 26-29
- [4] JUNG NGER M, FAA IJA, TURKENBURG W C. Global experience curves for wind farms [J]. Energy Policy, 2005, 33: 133-150
- [5] 观潮. 德国 500 kW 新型风力发电机投运 [J]. 华东电力, 2005, 33(4): 71
- [6] ROLF H. A comparison of control concepts for wind turbines in terms of energy capture [D]. Berlin: Technische Universität, 2002
- [7] MUTSCHLER P, ROLF H. Comparison of wind turbines regarding their energy generation [J]. Power Electronics Specialists Conference IEEE, 2002(1): 6-11
- [8] 徐大平, 张新房, 柳亦兵. 风力发电控制问题综述 [J]. 中国电力, 2005, 38(4): 70-74
- [9] 林西. 德国今年风力发电量预计将会增加 7.5% [EB/OL]. (2005-10-10) [2007-1-20]. http://www.cnele.com/CN/lnod-new_act-item_aix-9773/
- [10] 杨秀媛, 梁贵书. 风力发电的发展及其市场前景 [J]. 电网技术, 2003, 27(7): 78-79
- [11] 王承熙. 风力发电机组的控制技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999
- [12] 陈树勇, 戴慧珠, 白晓民, 等. 风电场的发电可靠性模型及其应用 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(3): 26-29
- [13] 陈为. 新能源发电, 谁是英雄 [EB/OL]. (2005-10-13) [2007-1-21]. <http://news.hexun.com/detail.asp?id=1358668>
- [14] 姚峰. 能源大国策: 多元维新 [EB/OL]. (2005-9-26) [2007-1-21]. <http://www.nanfangdaily.com.cn/south-news/sjjj/chanjing/200509260322.asp>
- [15] 易跃春. 风力发电现状、发展前景及市场分析 [J]. 国际电力, 2005, 8(5): 18-22
- [16] 我国第一台国产 MW 级风力发电机完成吊装 [J]. 中国电力, 2005, 38(7): 85
- [17] 杨军. 新能源——京都议定书带来的新奶酪 [J]. 证券导刊, 2005(1): 45-49
- [18] 张伯泉, 杨宜民. 风力和太阳能光伏发电现状及发展趋势 [J]. 中国电力, 2006, 39(6): 65-69

- [19] 王一娟. 新能源, 新机遇, 新时代 [EB/OL]. (2006-7-26) [2007-1-23]. http://jckh.xinhuanet.com/jbdq/2006-07/26/content_15421.htm
- [20] 李斌, 李安定. 太阳能热发电技术 [J]. 电力设备, 2004, 5(4): 80-82
- [21] 严陆光, 倪受元, 李安定. 太阳能与风力发电的现状与展望 [J]. 电网技术, 1995, 19(5): 1-9
- [22] 胡冬宜, 胡钧. 门窗散热器为太阳能供暖搭建理想平台 [J]. 中国建筑金属结构, 2005(9): 22-25
- [23] 汤叶华, 谢建. 光伏技术的发展现状 [J]. 可再生能源, 2005(3): 68-69
- [24] 艾斌, 杨洪兴, 沈辉, 等. 风光互补发电系统的优化设计 [J]. 太阳能学报, 2003, 24(4): 541-547
- [25] RAJESH KARKI ROY BILLNTON. Reliability/Cost implications of PV and wind energy utilization in small isolated power systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion 2001, 16(4): 368-373
- [26] ROY BILLNTON, RAJESH KARKI Capacity expansion of small isolated power systems using PV and wind energy [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(4): 892-897
- [27] 定世攀. 独立运行风/光互补电站控制监控系统的研究 [D]. 北京: 北京图书馆, 2002
- [28] 肖毅. 风/光互补发电系统的优化设计 [D]. 西安: 西安交通大学图书馆, 2001
- [29] 张森. 风力-太阳能混合发电控制系统的研究 [D]. 广州: 华南理工大学图书馆, 2004
- [30] 杨苹, 杨金明, 刘永强, 等. 分散式风力-太太阳能混合发电系统的研制 [J]. 能源技术, 2002, 23(3): 113-115

Status and Trend of Wind/Solar Power Generation

CHEN Jing-hua, YANG Yin in

(Faculty of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510090, China)

Abstract Wind energy and solar energy are abundant and renewable energy sources. Developing wind and solar power generation is an important move, which will contribute to improving energy structure, reducing environment pollution and protecting the environment. This paper introduced the status and trend of wind power and solar power. As a result of the discontinuous characteristics of wind energy and solar energy, hybrid power generation system was put forward. At last it introduced current research situation at home and abroad.

Key words wind power; solar power; hybrid generation